

Щеткин Борис Николаевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор отделения высшего образования,
Пермского филиала Волжский ГУВТ

КОНЦЕПЦИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ ОПАСНОМ СБЛИЖЕНИИ СУДОВ

Аннотация. Задача оценки риска опасного сближения судов решается на основе экстраполяции их траекторий. При этом информационной базой СУДС являются внешние траекторные измерения, поступающие от береговых радаров и/или бортовых транспондеров спутниковых навигационных систем. В этих условиях становится невозможной достоверная экстраполяция траекторий судов на больших интервалах времени, особенно, если суда маневрируют. В условиях высокой интенсивности движения это приводит к расширению множества решений, способных обеспечить безопасное движение и возрастанию неопределённости при принятии конкретного решения.

Ключевые слова: Ортогональная система, полиномиальные модели, модели безопасности, корабельный домен.

Рассматриваемый класс моделей позволяет реализовать специализированный подход, предназначенный для обработки потока измерительной информации, поступающей от одной или нескольких береговых двухкоординатных РЛС кругового обзора и/или бортовых транспондеров спутниковой навигационной системы, используемых как базовый источник навигационной информации для СУДС [2]. Наличие случайной компоненты эхо-сигнала и помех, связанных в том числе с конечным объёмом цифрового радиолокационного образа акватории, предопределяет выбор для распознавания опасных ситуаций моделей вероятностного типа.

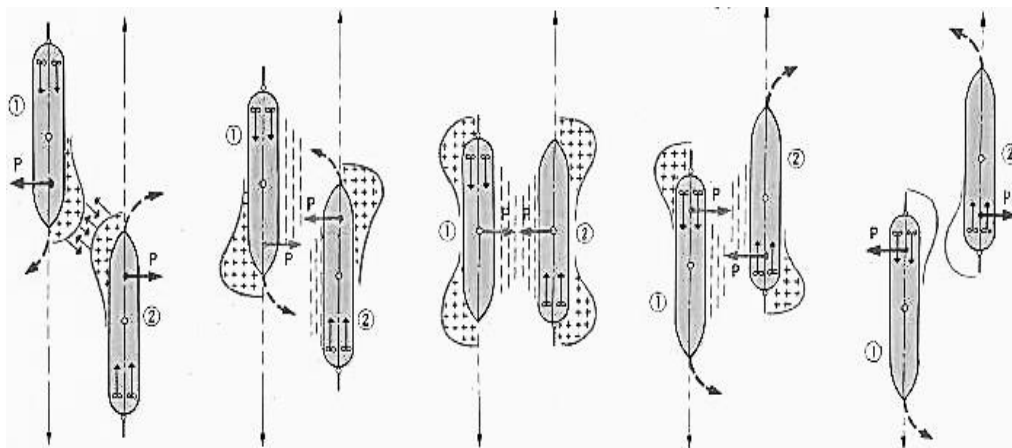


Рисунок 1. Воздействие гидродинамических сил при расхождении

Введём правую ортогональную систему отсчёта OXY , с осью y , направленной на Север, и осью x , направленной на Восток. Пусть измеряемыми параметрами являются декартовы координаты объекта. В этом случае модель измерений выглядит так:

$$\begin{aligned} z_x(t_k) &= x(t_k) + \xi_x(t_k) \\ z_y(t_k) &= y(t_k) + \xi_y(t_k) \end{aligned} \quad (1)$$



Здесь $x(t_k), y(t_k)$ – декартовы координаты наблюдаемого объекта в момент времени t_k , $\xi_x(t_k), \xi_y(t_k)$ – случайные инструментальные ошибки измерений.

В условиях естественного отсутствия при внешнем наблюдении данных о силах и моментах, действующих на объект и обуславливающих его траекторию на интервале наблюдения, будем описывать эволюцию координат объекта простейшими полиномиальными моделями [3]:

$$\begin{aligned}x(t) &= x(t_0) + \sum_{i=1}^{N_x} a_i^{(x)} (t - t_0)^i \\y(t) &= y(t_0) + \sum_{i=1}^{N_y} a_i^{(y)} (t - t_0)^i\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь N_x, N_y – порядок полинома, применяемого при описании эволюции координат,

$a_i^{(x)}, a_i^{(y)}$ – полиномиальные коэффициенты, отождествляемые со скоростями объекта и приведёнными значениями старших производных.

Таким образом, о системе уравнений ((1), (2)) можно говорить, как о модели задачи наблюдения, целью решения которой является определение вектора оценок $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$, причём момент времени t может как принадлежать интервалу наблюдения, так и лежать вне его. При этом в силу вероятностного характера значений оценок вектор $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$ имеет смысл только вместе с информацией о характеристиках случайных погрешностей оценивания (величинах $\Delta x(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, $\Delta y(t) = y(t) - \hat{y}(t)$).

Рассмотрим варианты формализации понятия «опасная ситуация» в рамках модели ((1), (2)). При моделировании навигационной безопасности коллективного движения прибегнем к традиционному приближению – построению модели безопасности «судно-судно» для каждой пары судов [1].

Модель относительного движения пары «судно – судно» – это математическое описание взаимного движения двух судов, которое используется для анализа навигационной безопасности, прогнозирования ситуаций сближения и разработки систем предупреждения столкновений.

Модели относительного движения пары «судно – судно» используются в:

- системах управления движением судов (СУДС) для диспетчеризации и предотвращения столкновений;
- алгоритмах предупреждения об опасном сближении;
- вычислительных экспериментах при тестировании навигационных систем;
- разработке алгоритмов для автономных судов, где важно учитывать намерения других участников движения.

Не теряя общности, рассмотрим береговую СУДС, реализующую внешнее наблюдение и имеющую информационной основой РЛС кругового обзора (измеряющую расстояние и азимут) и/или приёмо-передающие устройства Автоматической идентификационной системы (АИС) [4].

Измеряемыми параметрами ортогональной системы отсчёта OXY являются декартовы координаты объекта. В этом случае модель измерений координат каждого судна имеет вид (1). Рассмотрим два судна с координатами $x^{(1)}, y^{(1)}$, $x^{(2)}, y^{(2)}$ и скоростями $v_x^{(1)}, v_y^{(1)}$, $v_x^{(2)}, v_y^{(2)}$

Будем описывать их коллективное движение набором величин $(r_x, r_y, v, \eta_v, w_v)^T$ – вектором состояния коллективного движения двух судов,



где $r_x = x^{(2)} - x^{(1)}$, $r_y = y^{(2)} - y^{(1)}$ - координаты вектора относительного положения судов,

$v = \sqrt{(v_x^{(1)} - v_x^{(2)})^2 + (v_y^{(1)} - v_y^{(2)})^2}$ - скорость относительного движения судов,

η_v - направление вектора скорости относительного движения судов,

$w_v = d\eta_v/dt$ - скорость изменения угла η_v (рис. 2).

Примем следующие модельные представления об эволюции вектора состояния коллективного движения:

$$\begin{aligned}\dot{r}_x(t) &= -v \sin(\eta_v(t_0) + w_v(t - t_0)) \\ \dot{r}_y(t) &= -v \cos(\eta_v(t_0) + w_v(t - t_0)) \\ \dot{v} &= 0, \quad \dot{\eta}_v = w_v, \quad \dot{w}_v = 0\end{aligned}\tag{3}$$

С учётом (1) и (3) будем иметь следующие уравнения измерений:

$$\begin{aligned}z_{rx}(t_k) &= z_x^{(2)}(t_k) - z_x^{(1)}(t_k) = r_x(t_k) + \xi_{rx}(t_k) \\ z_{ry}(t_k) &= z_y^{(2)}(t_k) - z_y^{(1)}(t_k) = r_y(t_k) + \xi_{ry}(t_k)\end{aligned}\tag{4}$$
$$k = \overline{1, N}$$

Здесь $z_x^{(1)}(t_k), z_y^{(1)}(t_k)$ - измерения координат первого судна, $z_x^{(2)}(t_k), z_y^{(2)}(t_k)$ измерения координат второго судна; $z_{rx}(t_k), z_{ry}(t_k)$ - измерения соответствующих проекций вектора относительного положения судов, полученные в момент времени t_k , $\xi_{rx}(t_k), \xi_{ry}(t_k)$ - приведённые случайные ошибки измерений; N - число измерений.

Целью решения системы уравнений ((3), (4)) является оценка вектора состояния коллективного движения двух судов $\hat{s}(t) = (\hat{r}_x(t), \hat{r}_y(t), \hat{v}(t), \hat{\eta}_v(t), \hat{w}_v(t))^T$, отнесённая к выбранному моменту времени t , который может как принадлежать интервалу наблюдения, так и лежать вне его. Описанная модель движения (3) является кинематической моделью; модели такого типа традиционны при решении задач наблюдения в условиях отсутствия информации о силах и моментах, обуславливающих движение.

Совокупность величин $(r_x, r_y, v, \eta_v, w_v)^T$ свидетельствует о потенциально опасном движении двух судов в случае выполнения следующих двух неформальных условий:

- направление вектора скорости относительного движения судов близко к направлению вектора r ;
- величина w близка к скорости изменения направления вектора r ;
- время, оставшееся до сближения, меньше критического.

Формализация данных условий определяется, очевидно, трактовкой понятия «опасная ситуация».

Главным условием безопасного движения является недопущение опасного сближения судов. Это обеспечивается соблюдением «зоны безопасности» вокруг каждого судна, которая называется **корабельным доменом**. В некоторых моделях корабельный домен рассматривается как статическая окружность, жёстко привязанная к судну.

Определим корабельный домен в виде круга S_i^o радиуса R_i^o , очерченного вокруг условной точки - центра судна. Будем трактовать этот домен в статическом смысле - как зону, вторжение в которую интерпретируется как опасность (рис. 2).



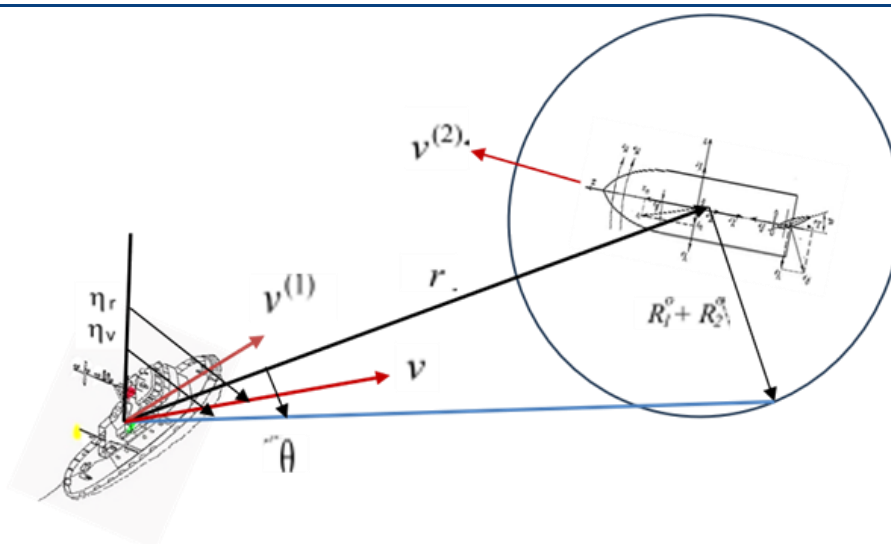


Рисунок 2. Модель относительного движения пары «судно-судно»

Это позволяет формализовать условия потенциально опасного движения двух судов следующим образом:

$$|\eta_v - \eta_k| < \Theta \quad (5)$$

$$|w_v - w_k| < \dot{\Theta} \quad (6)$$

$$0 < T < T^* \quad (7)$$

Здесь $|r| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$ – текущее расстояние между судами; $\eta_r = \arctan(r_x/r_y)$ азимут вектора r ;

$w_r = d\eta_r/dt = \frac{r_x v \cos \eta_v - r_y v \sin \eta_v}{|r|^2}$ – скорость изменения азимута вектора r ;

$\Theta = \arcsin(R_1 + R_2/|r|)$ – угол, определяемый расстоянием между судами и размерами доменов, считается, что в безопасном состоянии корабельные домены не должны «вторгаться» в область друг друга;

$\dot{\Theta} = d\Theta/dt = -\frac{R_1 + R_2}{|r|^2 \sqrt{1 - (R_1 + R_2)^2 / |r|^2}} \times \frac{d|r|}{dt}$ – скорость изменения угла Θ ;

$\frac{d|r|}{dt} = \frac{r_x v \sin \eta_v + r_y v \cos \eta_v}{|r|}$ – скорость изменения расстояния между судами;

$T = -\frac{|r|^2}{r_x v \sin \eta_v + r_y v \cos \eta_v}$ – приближённое время, оставшееся до максимального сближения судов;

T^* – пороговое значение для времени T .

Условие (5) формализует опасную ситуацию при равномерном и прямолинейном движении судов; условие (6) дополняет его в случае, если суда маневрируют; условие (7) отбирает из общего массива лишь те суда, время до сближения которых меньше порогового.

В свете рассмотренных модельных представлений [5] может быть поставлена общая обратная задача ((3), (4)), включающая в себя:



- определение параметров относительного движения $(r_x, r_y, v, \eta_v, w_v)$ для каждой пары судов на заданном интервале времени;
- определение для каждой пары судов условий (5)- (7)), характеризующих потенциально опасное движение;
- принятие решения о типе сложившейся ситуации (опасная/безопасная) и выдаче сигнала тревоги.

На практике определение в условиях внешнего наблюдения по конкретному судну (двум судам) уровня «*GREEN*» означает, что его движение не представляет опасности; уровня «*YELLOW*» означает, что опасная ситуация возможна, но при этом судно (суда) маневрирует, то есть судоводитель, скорее всего, сам контролирует ситуацию и старается придать движению безопасный характер; уровня «*RED*» – движение судна (судов) ведёт к опасности и необходимо начать манёвр уклонения [5].

Список литературы:

1. Девятисильный, А.С. Информационные модели систем управления безопасностью движения в насыщенных судопотоках / А.С. Девятисильный, Дерябин, В.В. Модель счисления пути судна в условиях воздействия внешних факторов / В.В. Дерябин // Эксплуатация морского транспорта. – 2011. – №1. – С. 33-39.
2. Егоров, И.Б. Концепция зон навигационной безопасности и её применение в судовождении / И.Б. Егоров, В.А. Логиновский // Эксплуатация морского транспорта. – 2012. – №3. – с. 13-17.
3. Калман, Р. Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арbib. – М.: Едиториал УРСС, 2010. 400 с.
4. Маринич, А.Н. Судовая автоматическая идентификационная система АИС / А.Н. Маринич. – М.: Судостроение, 2004. 180 с.
5. Щеткин Б.Н. Применение динамических наблюдателей для повышения энергетической эффективности и качество работы судовых систем и средств автоматики // Анализ и синтез в современной науке: сборник статей VII международной научной конференции (Санкт-Петербург, Апрель 2026). – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», – 2026. – с. 77-87.

